

**UBICACION DE ESTACIONES DE RECARGA DE VEHICULOS  
ELECTRICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION USANDO UNA  
TECNICA HEURISTICA**

**MARIA FERNANDA NARVAEZ ENRIQUEZ**

**FACULTAS DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA  
UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA  
PEREIRA  
2019**

**UBICACION DE ESTACIONES DE RECARGA DE VEHICULOS  
ELECTRICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION USANDO UNA  
TECNICA HEURISTICA**

**MARIA FERNANDA NARVAEZ ENRIQUEZ**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA ELECTRICISTA**

**DIRECTOR  
RICARDO HINCAPIÉ**

**FACULTAS DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRICA  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
PEREIRA  
2019**

# Dedicatoria

Este proyecto de grado está dedicado:

Principalmente a Dios por ser la fuente de valentía que me llevo a tomar decisiones drásticas como salir a otra ciudad lejos de mi familia a emprender un sueño que ahora se ha vuelto una realidad.

A mis padres por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años: gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí haciendo posible este reto y convertirme en lo que soy.

A mi hermana por estar siempre presente, acompañándome en los buenos y sobre todo en los malos momentos, por ser el apoyo incondicional de salir adelante y luchar por cada uno de mis sueños.

A mis amigos de la universidad que formaron parte de mi aprendizaje y crecimiento personal y profesional, y que además se convirtieron en familia cuando más los necesitaba.

# Agradecimientos

Agradezco a mis padres y hermana por hacer posible este sueño, a los que fueron mis amigos y compañeros durante el transcurso de mi carrera. Así mismo al Ingeniero Ricardo Hincapié director de esta tesis, quien con sus valiosos conocimientos y enseñanzas hizo que culminara este proyecto; además por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad. Y a la universidad Tecnológica de Pereira por contribuir en mi formación académica y personal, que ahora en adelante gracias a ella y a todas aquellas personas emprenderé de la mejor manera mi nuevo camino profesional.

# Resumen

En este proyecto se plantea una metodología para la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en sistemas de distribución de energía eléctrica, usando una técnica heurística. El objetivo principal es proporcionar una herramienta para la toma de decisiones que beneficie a los operadores de red, de forma que permita garantizar un mejor equilibrio técnico y económico.

# Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>Introducción</b>	<b>9</b>
<b>1.    Sistemas de distribución</b>	<b>16</b>
<b>1.1.    Clasificación de los sistemas de distribución</b>	<b>17</b>
1.1.1. De acuerdo a su construcción	17
1.1.2. De acuerdo a los niveles de tensión	19
1.1.3. De acuerdo a su ubicación	19
1.1.4. De acuerdo al tipo de carga	20
<b>1.2.    Topologías típicas</b>	<b>21</b>
<b>2.    Estaciones de recarga de vehículos eléctricos</b>	<b>23</b>
<b>2.1.    Tipos de carga</b>	<b>23</b>
<b>2.2.    Modos de carga de un vehículo eléctrico</b>	<b>24</b>
<b>2.3.    Tipos de conectores</b>	<b>26</b>
<b>3.    Metodología propuesta</b>	<b>27</b>
<b>3.1.    Estimación de pérdidas técnicas</b>	<b>27</b>
<b>3.2.    Metodología propuesta</b>	<b>29</b>
<b>4.    Aplicación y resultados</b>	<b>30</b>
<b>5.    Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>42</b>
<b>5.1.    Conclusiones</b>	<b>42</b>
<b>5.2.    Recomendaciones</b>	<b>42</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>44</b>
<b>Anexo</b>	<b>46</b>

# Lista de Figuras

	Pág.
1.1. Sistema de potencia	16
2.1. Esquema de la instalación eléctrica de una ERVE	23
2.2. Modos de carga de un vehículo eléctrico	25
2.3. Prototipo de conexión de un VE a una red eléctrica	26
4.1. Ubicación del sector bajo estudio	30
4.2. Sistema de prueba implementado en Neplan	31
4.3. Ruta 1	32
4.4. Ruta 2	32
4.5. Ruta 3	33
4.6. Ruta 4	33
4.7. Ruta 5	33
4.8. Ruta 6	34
4.9. Ruta 7	34
4.10. Ruta 8	34
4.11. Ruta 9	35
4.12. Ruta 10	35
4.13. Ruta 11	35
4.14. Ruta 12	36
4.15. Ruta 13	36
4.16. Ruta 14	36
4.17. Ruta 15	37
4.18. Lugares candidatos para la ubicación de ERVE	38
4.19. Ubicación de las ERVE	39
4.20. Ubicación de las ERVE	39

# Lista de Tablas

	Pág.
1.1. Factores que influyen en el desarrollo de ERVE en Colombia	13
4.1. Información de las rutas empleadas	37
4.2. Carga total conectada a una ERVE	38
4.3. Índices de sensibilidad obtenidos	38
4.4. . Distancias de los tramos entre ERVE	40
4.5. Rutas transitadas por cada lugar candidato	40
4.6. Características de los lugares candidatos	41



# Introducción

Los altos índices de contaminación ambiental presentes en el planeta han ocasionado que en los últimos años se tomen medidas pertinentes como políticas de estado a nivel mundial [1]. Estas políticas están encaminadas a la reducción de gases contaminantes que permitan disminuir el deterioro del medio ambiente. Uno de los sectores que más ha contribuido a la emisión de estos gases es el automotriz, dado que la gran mayoría de vehículos emplean derivados del petróleo como combustible, los cuales emplean cerca del 30% de la energía provista por el combustible y el porcentaje restante se transforma en gases y calor [2].

Lo anterior ha motivado al sector automotriz a desarrollar nuevas tecnologías que permitan usar fuentes alternas de energía y por ende, disminuir la emisión de gases contaminantes. Entre las fuentes alternas se encuentran el gas natural, diesel y electricidad. Esta última tecnología ha permitido solucionar el problema planteado anteriormente, y además ha impulsado avances acelerados en el desarrollo de este tipo de automotores, lo cual se ha convertido en un nuevo y atractivo mercado para inversionistas interesados. De acuerdo a esto, grandes empresas como Toyota, Tesla y Mercedes Benz han enfocado sus nuevas líneas de negocio al desarrollo de estos nuevos tipos de vehículos, así como los componentes necesarios para garantizar su adecuado funcionamiento, es decir, baterías y sus estaciones de recarga de vehículos eléctricos (ERVE).

De acuerdo a cifras expuestas en la Conferencia de las Naciones Unidas en Diciembre de 2015 sobre el cambio climático, se espera que para el año 2030 el 20% de los vehículos sean eléctricos. Un ejemplo claro de esta tendencia es Japón, el cual en este momento tiene más electrolineras (estaciones de recarga de vehículos eléctricos), que gasolineras (40.000 y 34.000 respectivamente) [3]. Sin embargo otros países en el mundo como China, Noruega y Estados Unidos han tenido comportamientos similares, los cuales en el año 2015 se convirtieron en los países con mayor cantidad de vehículos eléctricos en el mundo.

Dentro de este contexto Colombia no ha sido la excepción, ya que el gobierno colombiano tiene como política de estado la integración paulatina de estas tecnologías en la sociedad. Prueba de esto es que por medio del Decreto 2909 de 2013 [4], se aprobó que en los años 2014 al 2016 se importen alrededor de 750 unidades de vehículos eléctricos. Adicionalmente en el mismo Decreto se aprobó la importación anual de 100 unidades de recarga (electrolineras) para ser instaladas en el país y 1500 unidades de recarga domiciliaria, por un periodo de tres años.

De igual forma, alguna normatividad en Colombia ha ido cambiando para permitir una mejor integración de lugares de recarga de vehículos eléctricos. La Norma NTC 2050 en la sección 625 describe la forma como deben ser construidas estaciones de recarga para estos vehículos alimentadas por niveles de baja tensión [5]. Con respecto a la ubicación de electrolineras no hay políticas claras que direccionen adecuadamente su ubicación.

Las electrolineras requieren de un suministro de energía eléctrica que debe ser proporcionada por los sistemas de distribución, donde su tamaño depende de la cantidad de vehículos que pueda

recargar en un momento determinado. Dado que su capacidad de recarga es directamente proporcional al consumo de energía que requieren de la red eléctrica, este tipo de estaciones imponen nuevas condiciones operativas a los sistemas de distribución, debido al volumen de energía que en algunos casos podrían necesitar.

Tradicionalmente los sistemas de distribución se han diseñado determinando el momento, el tamaño y la cantidad de elementos eléctricos que deben ser instalados en el sistema, considerando ya sea elementos nuevos o ampliación de la capacidad de los existentes (subestaciones y tramos de red). Debido a la gran cantidad de soluciones que este tipo de problemas posee, estos son catalogados como NP-completo, por lo que en su solución deben emplearse metodologías eficientes que permitan encontrar topologías que cumplan los requerimientos técnicos del sistema, al menor costo posible. Una adecuada planeación permite obtener menores inversiones para el Operador de Red (OR), encontrar puntos de operación dentro de límites permitidos por normatividad y garantizar el cumplimiento de la vida útil de los elementos. Por otro lado, un inadecuado plan de diseño puede ocasionar sobrecargas en elementos, violación de la regulación de tensión, aumento de pérdidas técnicas o empeoramiento de índices de confiabilidad de la red. Adicionalmente una ubicación y dimensionamiento inadecuado de las electrolineras puede acrecentar los problemas mencionados previamente.

Sin embargo puede darse el caso en que los propietarios de las electrolineras sean diferentes a los OR del sistema de distribución, lo cual conlleva a un problema mayor. Los propietarios de las electrolineras buscan la localización de las estaciones en un lugar donde puedan abastecer los vehículos eléctricos, pero al menor costo posible. En cambio los OR pretenden que las estaciones de recarga tengan una ubicación tal, que permitan alimentar un número establecido de vehículos, impactando de la menor forma posible la planeación de la red eléctrica. La ubicación de las estaciones en ambos casos no necesariamente es la misma, por lo que se presentan conflictos en los beneficios técnicos y económicos para las dos partes involucradas (propietarios y OR). Esta situación impone la necesidad de plantear el siguiente interrogante, ¿Dónde ubicar adecuadamente las estaciones de recarga de vehículos eléctricos, de forma que se encuentre un equilibrio que satisfaga los actores involucrados en esta problemática?

La solución a esta pregunta origina el desarrollo de esta investigación, para lo cual se propone una metodología general que pueda ser aplicada en el sector eléctrico y contemple diferentes escenarios reales. Esto es, OR que deseen ubicar ERVE en su sistema o agentes externos que deseen ubicar ERVE en los sistemas de distribución. Esta metodología tiene como objetivo principal encontrar la ubicación óptima de ERVE que permita reducir el impacto de su integración en la planeación de las redes de distribución de energía eléctrica, la cual debe garantizar el cumplimiento de criterios técnicos y económicos al menor costo posible, para los participantes involucrados. Es preciso aclarar que esta metodología no considera el problema del ruteo de los vehículos eléctricos y que la red de transporte considerada corresponde a un sistema de transporte masivo existente. Sin embargo, el conjunto de posibles ubicaciones de las ERVE es proporcionado previamente en función de las necesidades de cada uno de los agentes involucrados.

El desarrollo de esta metodología proporciona herramientas adicionales para la toma de decisiones de los actores involucrados en la planeación de las redes de distribución, con el fin de

evitar situaciones indeseadas, y que además permita su integración en los nuevos esquemas de operación de las redes eléctricas.

- **Estado del arte**

Los primeros desarrollos realizados sobre vehículos eléctricos fueron reportados a mediados del siglo XIX [6]. Durante el transcurrir del siglo XX se presentaron algunos avances y nuevas tecnologías, entre las que se destacan las presentadas en [7], [8], [9] y [10]. En 1990 se presenta un punto de inflexión en la industria automotriz, al lanzarse al mercado el vehículo Impact producido por General Electric. A partir de este momento se genera una nueva línea de mercado en esta industria, por lo que aparecen cada vez mayores participantes. En esta década son varios los vehículos que impactan por su diseño y tecnología, entre los que se destacan los producidos por Mercedes Benz en 1994 (Necar 1), General Motors en 1996 (EV-1) y Toyota en 1997 (Prius). Posteriormente en 2003 es fundada la empresa Tesla, con el fin de participar en este mercado a partir del desarrollo de baterías para estos vehículos. En 2008 la empresa BYD Auto lanza al mercado su vehículo F3DM, el cual es el primer vehículo enchufable con característica híbrida (gasolina y electricidad). En el comienzo de la segunda década del siglo XXI, Tesla revoluciona el mercado al aparecer los vehículos Model S en 2012 y Model X en 2015, los cuales tienen una autonomía mayor a los existentes en el mercado.

Durante el desarrollo de los vehículos eléctricos se han mejorado las características asociadas a las baterías empleadas, creciendo cada vez más su autonomía y eficiencia. A pesar de esto, la integración de estos vehículos en la sociedad actual ha ocasionado que se tengan que realizar nuevos estudios y desarrollos sobre la forma de recargar sus baterías. Uno de estos mecanismos son las estaciones de intercambio o recarga de baterías, temática alrededor de la cual se presentan a continuación las investigaciones más relevantes. Schoroder y Traber (2012) [11], investigan la rentabilidad de varios tipos de estaciones de carga en Alemania mediante el cálculo del retorno estimado de la inversión. Wagner et al. (2013) [12], sugieren una estrategia basada en sistemas inteligentes para determinar ubicaciones óptimas de estaciones de recarga para vehículos eléctricos. En esta investigación se asocian ubicaciones óptimas con posibles puntos de interés como restaurantes, almacenes, tiendas y parques, asumiendo que a los usuarios potenciales de los vehículos eléctricos les gustaría recargar su vehículo en los sitios en donde ocupan la mayor parte de su tiempo.

Chen et al. (2013) [13], utilizan información de estacionamientos para identificar los sitios óptimos para la ubicación de estaciones de recarga en la región de Seattle. Su modelo minimiza los costos de acceso para los usuarios de vehículos eléctricos en función de la distancia entre la estación de recarga y el destino final del usuario. Andrews et al. (2013) [14], desarrollan un modelo de programación lineal entero-mixto que determina la ubicación óptima de estaciones de recarga, minimizando la distancia total del trayecto de cada vehículo a la estación de recarga.

Rastegarfar et al. (2013) [15], establecen una micro-red dentro de un área geográfica de interés. Las características de la red son empleadas para determinar los puntos candidatos para ubicar las estaciones de recarga, donde los costos de inversión y los costos de operación son calculados para cada estación.

Sebastiani et al. (2014) [16], presentan una solución óptima para ubicar estaciones de recarga basada en un modelo de tráfico, las cuales son localizadas en sitios particulares a través de un conjunto de rutas, permitiendo a los vehículos eléctricos ser recargados antes que sus baterías se descarguen.

Phonrattanasak et al. (2014) [17], implementan una optimización por colonia de hormigas para encontrar la mejor ubicación para las estaciones de recarga rápida. Las estaciones son ubicadas óptimamente en áreas de tráfico denso para minimizar el costo de instalación de la estación y las pérdidas en la red de distribución.

Lam et al. (2014) [18], formulan el problema de ubicación de estaciones de recarga y proponen cuatro métodos en función de los requisitos de calidad de la solución, la eficiencia algorítmica, tamaño del problema, la naturaleza del algoritmo y la existencia de requerimientos del sistema.

Li et al. (2015) [19], desarrollan un esquema de implementación óptima de estaciones de recarga, que toma los datos históricos de las trayectorias de los taxis, datos de mapas de carreteras e información existente de estaciones de recarga como entradas y llevan a cargo la ubicación óptima de estaciones de recarga y la asignación óptima de puntos de carga.

Chen et al. (2015) [20], proponen un algoritmo genético mejorado para resolver el problema de la ubicación óptima de estaciones de recarga para vehículos eléctricos considerando la economía, la capacidad, la cobertura y la comodidad. En el contexto colombiano, en Mayo de 2014 se inauguró la primera electrolinera para recargar taxis eléctricas en Colombia [21]. Luego en Marzo de 2015 se puso en funcionamiento la primera electrolinera en Colombia para carros particulares, la cual está ubicada en Bogotá en el sector de Unicentro [21]. A principios del año 2016 las Empresas Condensa y Terpel firman un convenio en el cual se comprometen a desarrollar puntos de carga eléctrica en estaciones de servicio [21]. De acuerdo a la revisión del estado del arte realizada, se puede observar que no hay registros adicionales de ubicación de este tipo de estaciones de recarga en ciudades diferentes a Bogotá, y además se puede evidenciar que estas iniciativas obedecen más a políticas de un Operador de Red en particular que a un comportamiento masivo. Esto evidencia una falencia de investigaciones y metodologías que permitan desarrollar proyectos de este tipo en el país, lo cual avala aún más la investigación que se pretende realizar.

Es necesario tener en cuenta que actualmente hay países que llevan varios años trabajando en el desarrollo del mercado de los vehículos con propulsión eléctrica o híbrida los cuales tendrán una mayor participación del mercado a nivel mundial, incidiendo en la instalación de nuevos puntos de recarga que se debe acordar con los operadores de red respectivos. A continuación, se muestran algunos casos que han marcado hechos representativos actualmente.

- **Contexto colombiano**

En Colombia se han definido políticas, planes y acciones para favorecer el uso de la tecnología eléctrica en el sector del transporte, por lo cual se ha convertido en un punto de referencia en el continente [22]. Por ejemplo en Bogotá en el proyecto EVA Codensa, las iniciativas surgieron a partir de la llegada de 42 taxis eléctricos en Bogotá. Este proyecto ha acumulado un recorrido

superior a los 3,8 millones de kilómetros y un consumo de 1,2 GWh en cerca de dos años de servicio. La infraestructura eléctrica incluida en el proyecto, que demuestra su visión a largo plazo, está conformada por cuatro electrolineras situadas en la ciudad (que suman 41 cargadores), con una capacidad para aprovisionar energía a cerca de 400 unidades vehiculares [22]. De acuerdo a las normas que rigen el país se consideraron algunos factores importantes para llevar a cabo el proyecto de la movilidad eléctrica [22]. A continuación en la Tabla 1.1 se ilustran algunos factores que se deben tener en cuenta a la hora de implementar proyectos de este tipo [22].

**Tabla 1.1. Factores que influyen en el desarrollo de ERVE en Colombia [22]**

<b>Factor</b>	<b>Tipo (barrera de entrada o promotor)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Título del factor</b>
Políticos	Promotores	Buscar fomentar la eficiencia energética y la reducción de la emisión de carbono en el sector del transporte	El programa de uso racional y eficiente de la energía y fuentes no convencionales
		Busca explorar, proponer e implementar tecnologías eficientes y bajas en emisiones	Estrategia Colombiana de desarrollo bajo en carbono
Regulatorios	Barrera de entrada	Desestimulan la promoción de la tecnología en el sector automotriz	Plan de Ascenso Tecnológico
		No existen zonas en las cuales se restrinjan la circulación de vehículos ineficientes o contaminantes, corredores verdes, ni zonas de bajas emisiones	Falta de Homologación de Vehículos eléctricos en el país
Económico	Promotores	Los altos precios de los combustibles fósiles en el país motivan a los consumidores a buscar otras soluciones	Planes de movilidad urbana sostenible
	Barrera de entrada	Muchos de los componentes de los vehículos eléctricos requieren ser importados y los costos por las tasas de cambios son muy altos	Precios de combustible
Transporte	Promotores	La movilidad de transporte eléctrico se basa principalmente a reducir la contaminación atmosférica al medio ambiente. E innovar nuevas tecnologías al mercado para un mejor beneficio de costos y vida útil	Tasa de cambio moneda local
Distancia	Promotores	Los proyectos de estaciones de recarga en Colombia han venido desarrollando estrategias para la construcción de las electrolineras de acuerdo al tipo de vehículo, baterías, modo de recarga que se implementen	Movilidad eléctrica
			Capacidades científicas en vehículos eléctricos

## • Contexto mundial

### – Holanda movilidad eléctrica sostenible

Los pioneros en iniciar las grandes estaciones de recarga fue Holanda, el cual es un pequeño país europeo que apuesta por la movilidad eléctrica sostenible. Construyeron una serie de

estaciones de recarga rápida repartidas estratégicamente, que tienen una distancia entre ellas de 50 km, donde cada una está equipada con cargadores rápidos que tienen la capacidad de 15 a 30 minutos para recargar, además que tiene una fuente de energía alternativa con paneles solares, para cualquier tipo de vehículo ya sea completamente eléctrico o híbrido [23].

- Barcelona incorporara autobuses sostenibles e implementa el primer punto de carga ultrarrápida para autobuses eléctricos

El Área Metropolitana de Barcelona aprobó la renovación de autobuses de gestión indirecta, una inversión presupuestada con 68 millones de euros y que prevé renovar 165 autobuses durante los próximos años. Todos los autobuses que se introducen serán sostenibles, siendo 140 híbridos y 25 eléctricos puros. De este modo, el objetivo es mejorar la calidad del aire del Área Metropolitana de Barcelona, reduciendo el número de vehículos diésel. Movimientos como estos son esenciales para garantizar el buen funcionamiento de las atmósferas urbanas, las cuales se encuentran en plena saturación de gases contaminantes. No obstante, todavía queda mucho por hacer ya que el objetivo final debe ser la electrificación de todo el servicio de autobuses. Se ha presentado el punto de carga ultrarrápida para autobuses eléctricos de Endesa en Barcelona junto con el nuevo autobús articulado 100% eléctrico. Se trata de un sistema que, en unos minutos, añade carga a la batería aprovechando el tiempo de parada al final de línea, y la llena hasta un 80%. Está equipada con cargadores ultrarrápidos que tienen la capacidad de 5 a 10 minutos para recargar y las estaciones de recarga tienen una distancia entre ellas de 30 km [23].

- Hyundai presenta su autobús eléctrico

Las ciudades se han convertido en el punto caliente de la movilidad eléctrica ya que la contaminación se centra básicamente en la zona urbana. Para combatir el problema una de las soluciones pasa sin duda por el transporte público, el cual debe dar un paso al frente en cuanto a la electrificación. De momento ya son distintos los fabricantes que han surgido últimas tecnologías como lo son Hyundai, quien ha presentado en el salón de vehículos industriales de Corea en llevar a cabo el transporte masivo con autobuses urbanos completamente eléctricos. Su apariencia es francamente interesante y puede ser una buena propuesta para grandes ciudades de cualquier punto del planeta. Tiene una potencia de 240 kW (327 CV), así como una batería con capacidad de 256 kWh, lo que le otorga una autonomía de 290 kilómetros, cifra realmente interesante para desenvolverse día a día. Con ello conseguirá reducir el gasto respecto a un modelo diésel, además de obviamente dejar el aire libre de emisiones. Respecto a las recargas, el margen de las estaciones de recarga debe ser normalmente de tomas lentas, pero la marca coreana anuncia que también está habilitado para tomas de alta potencia, por tal motivo el vehículo es apto para recargarse en una hora completamente.

- Redes de servicio para la recarga de vehículos en Green Charge Networks (USA)

El método que utilizan las redes de servicio para la recarga de vehículos facilita la carga de los módulos de batería, así como la rápida desconexión de estos. También ayuda a reducir la relación tamaño/peso de los almacenadores. Está compuesto por un sistema de módulos de baterías que permiten a los proveedores de servicio anticipar y adaptarse a la capacidad de

recarga del vehículo. Además, le permite al usuario añadir módulos de batería para aumentar la capacidad de almacenamiento de energía. El método garantiza que los módulos de batería puedan ser desconectados rápidamente y manejen un modo de recarga ultrarrápido, proporcionando así seguridad y evitando a los usuarios posibles choques o arcos eléctricos. Del mismo modo, la fácil desconexión de los módulos garantiza que las baterías agotadas puedan reemplazarse rápidamente por baterías cargadas. Permite instalaciones de intercambio en un área de servicio, lo cual reduce la necesidad de reabastecimiento de los vehículos. También funciona como una medida de asistencia para la recarga de baterías en carretera [24].

# Capítulo 1

## Sistemas de distribución

Los sistemas de distribución son la parte de los sistemas eléctricos de potencia encargados de recibir la energía proveniente de los sistemas de transmisión y reducirla a niveles de tensión adecuados para el consumo de clientes residenciales, comerciales o industriales (Figura 1.1).

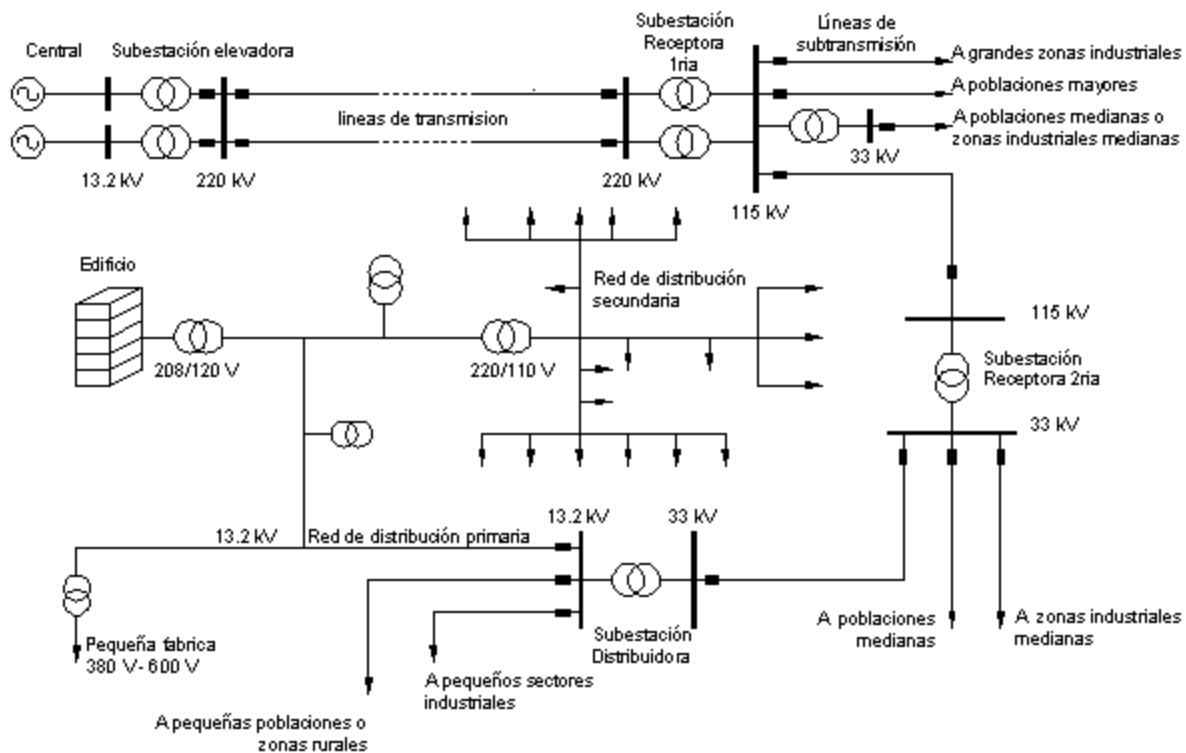


Figura 1.1. Sistema de potencia [25]

Los elementos que conforman un sistema de distribución son [25-27]:

- Subestaciones: es el lugar donde se transforma la energía recibida de las líneas de transmisión y dan origen a los circuitos de distribución primarios.
- Circuitos primarios: recorren cada uno de los sectores urbanos y rurales suministrando potencia a los transformadores de distribución a voltajes entre 11.4 kV y 13.2 kV.
- Transformadores de distribución: se conectan a un circuito primario y suministran servicio a los consumidores o abonados conectados al circuito secundario.



- Circuito secundario: encargados de distribuir la energía a los usuarios con voltajes menores a 600 V.

## **1.1. Clasificación de los sistemas de distribución**

### **1.1.1. De acuerdo a su construcción**

- Redes de distribución aéreas

En estas redes el conductor va soportado a través de aisladores instalados en crucetas, en postes de madera o de concreto.

Tienen las siguientes ventajas:

- Costo inicial más bajo.
- Son las más comunes y materiales de fácil consecución.
- Fácil mantenimiento.
- Fácil localización de fallas.
- Tiempos de construcción más bajos.

Tienen las siguientes desventajas:

- Mal aspecto estético.
- Menor confiabilidad.
- Menor seguridad (ofrece más peligro para los transeúntes).
- Son susceptibles a fallas y cortes de energía ya que están expuestas a descargas atmosféricas, lluvia, granizo, polvo, temblores, gases contaminantes, brisa salina, vientos, contactos con cuerpos extraños, choques de vehículos y vandalismo.

Las partes principales de un sistema aéreo:

- Postes: pueden ser de madera, concreto o metálicos y sus características de peso, longitud y resistencia a la rotura son determinadas por el tipo de construcción de los circuitos. Son utilizados para sistemas urbanos postes de concreto de 14, 12 y 10 metros con resistencia de rotura de 1050, 750 y 510 kg, respectivamente.
- Conductores: son utilizados para circuitos primarios el aluminio y el ACSR desnudos y en calibres 4/0, 2/0, 1/0 y 2 AWG, y para circuitos secundarios en cables desnudos o aislados y en los mismos calibres. Estos circuitos son de 3 y 4 hilos con neutro puesto a tierra.
- Crucetas: son utilizadas crucetas de madera inmunizada o de ángulo de hierro galvanizado de 2 metros para 13.2 kV y 11.4 kV con diagonales en varilla o de ángulo de hierro (pié de amigo).
- Aisladores: son del tipo ANSI 55.5 para media tensión (espigo y disco) y ANSI 53.3 para baja tensión (carretes).

- Herrajes: todos los herrajes utilizados en redes aéreas de baja y media tensión son de acero galvanizado (grapas, varillas de anclaje, tornillos de máquina, collarines, espigos, etc).
  - Equipos de seccionamiento: el seccionamiento se efectúa con cortacircuitos y seccionadores monopoles para operar sin carga (100 A - 200 A).
  - Transformadores y protecciones: se emplean transformadores monofásicos con valores nominales de 25, 37.5, 50 y 75 kVA, y para transformadores trifásicos de 30, 45, 75, 112.5 y 150 kVA, protegidos por cortacircuitos, fusible y pararrayos de 12 kV.
- Redes de distribución subterráneas

Son empleadas en zonas donde por razones de urbanismo, estética, congestión o condiciones de seguridad no es aconsejable el sistema aéreo. Actualmente el sistema subterráneo es competitivo frente al sistema aéreo en zonas urbanas céntricas.

Tiene las siguientes ventajas:

- Mucho más confiable ya que la mayoría de las contingencias mencionadas en las redes aéreas no afectan a las redes subterráneas.
- Son más estéticas, pues no están a la vista.
- Son mucho más seguras.
- No están expuestas a vandalismo.

Tienen las siguientes desventajas:

- Su alto costo de inversión inicial.
- Se dificulta la localización de fallas.
- El mantenimiento es más complicado y reparaciones más demoradas.
- Están expuestas a la humedad y a la acción de los roedores.

Los conductores utilizados son aislados de acuerdo al voltaje de operación y estos están conformados por varias capas aislantes y cubiertas protectoras. Estos cables están directamente enterrados o instalados en bancos de ductos (dentro de las excavaciones), con cajas de inspección en intervalos regulares.

Un sistema subterráneo cuenta con los siguientes componentes:

- Ductos: pueden ser de asbesto cemento, de PVC o conduit metálicos con diámetro mínimo de 4 pulgadas.
- Cables: pueden ser monopoles o tripoles aislado en polietileno de cadena cruzada XLPE, de polietileno reticulado EPR, en caucho sintético y en papel impregnado en aceite APLA o aislamiento seco elastomérico en calibres de 500 - 400 - 350 - 250 MCM, 4/0 y 2/0 AWG en sistemas de 13.2 kV, 7,6 kV y 4,16 kV. A pesar de que existen equipos adecuados, resulta difícil y dispendioso localizar las fallas en un cable subterráneo y su reparación puede tomar mucho tiempo. Los cables a instalar en baja tensión son aislados a 600 V con polietileno termoplástico PE-THW y recubierto con una chaqueta protectora de PVC y en calibres de 400 - 350 - 297 MCM 4/0 y 2/0 AWG.

- Cámaras: son de varios tipos siendo la más común la de inspección y de empalme, la cual sirve para hacer conexiones, pruebas y reparaciones. Allí llegan uno o más circuitos y pueden contener equipos de maniobra, son usados también para el tendido del cable. La distancia entre cámaras puede variar, así como su forma y tamaño.
- Empalmes uniones y terminales: permiten dar continuidad adecuada y conexiones entre cables y equipos.

### **1.1.2. De acuerdo a los niveles de tensión**

- Redes secundarias

En Colombia existen varios voltajes nominales para circuitos secundarios. Los siguientes son los voltajes empleados en redes urbanas y rurales que permiten abastecer al servicio residencial, comercial, a la pequeña industria y al alumbrado público cuando estos 2 últimos son alimentados por la red secundaria:

- Monofásico trifilar 240/120 V con punto central a tierra.
- Trifásico tetrafilar 208/120 V con neutro a tierra y 220/127 V con neutro a tierra.
- Trifásico en triángulo con transformadores monofásicos, de los cuales uno solo tiene conexión a tierra 240/208/120 voltios.

Los voltajes citados se refieren a la tensión de placa en los transformadores de distribución.

Para los sistemas industriales y de alumbrado público que requieren un transformador propio independiente de la red secundaria, son muy comunes las siguientes tensiones nominales.

- Trifásico 480/277 V en estrella.
- Trifásico 480/240 V en delta.

- Redes primarias

En Colombia se diseñan los circuitos primarios a diferentes voltajes. Se establecen como voltajes nominales empleados 11.4 kV, 13.2 kV o 13.8 kV.

### **1.1.3. De acuerdo a su ubicación**

Un sistema de distribución debe atender usuarios de energía eléctrica localizados en zonas urbanas, rurales y turísticas. Por lo tanto:

- Redes urbanas

Los programas de distribución urbana son desarrollados individualmente por cada empresa de energía y la mayoría de las veces son planes de remodelación y recuperación de pérdidas. Las principales características de las redes de distribución urbana son las siguientes:

- Usuarios muy concentrados.
  - Cargas bifilares, trifilares y trifásicas.
  - Facilidad de acceso.
  - En general se usa postería de concreto.
  - Es necesario coordinar los trazados de la red eléctrica con las redes telefónicas, redes de acueducto, alcantarillados y otras redes, igualmente tener en cuenta los parámetros de las edificaciones.
  - Se usan conductores de aluminio, ACSR y cobre.
  - Facilidad de transporte desde los proveedores de materiales y equipos al sitio de la obra.
  - Transformadores generalmente trifásicos en áreas de alta densidad de carga y monofásicos en áreas de carga moderada.
  - La separación entre conductores y estructuras de baja tensión y media tensión son menores.
- Redes rurales

Las principales características de las redes de distribución rural son:

- Usuarios muy dispersos.
- Cargas generalmente monofásicas.
- Dificultades de acceso en las zonas montañosas lo que implica incremento en costos en el transporte y manejo de materiales.
- En zonas accesibles se usa postería de concreto.
- En zonas de difícil acceso se usa postería de madera inmunizada.
- Los transformadores por lo general son monofásicos.
- Conductores ACSR por lo general.

#### **1.1.4. De acuerdo al tipo de carga**

La finalidad a la cual el usuario destina la energía eléctrica también sirve de criterio para clasificar las cargas.

- Redes de distribución para cargas residenciales

Comprenden básicamente los edificios de apartamentos, multifamiliares, condominios, urbanizaciones, etc. Estas cargas se caracterizan por ser eminentemente resistivas (alumbrado y calefacción) y aparatos electrodomésticos de pequeñas características reactivas. De acuerdo al nivel de vida y a los hábitos de los consumidores residenciales y teniendo en cuenta que en los centros urbanos la gente se agrupa en sectores bien definidos, los abonados residenciales se clasifican de acuerdo a las clases socioeconómicas como:

- Zona clase alta: constituida por usuarios que tienen un alto consumo de energía eléctrica (estratos 5 y 6).

- Zona clase media: conformado por usuarios que tienen un consumo moderado de energía eléctrica (estrato 4).
- Zona clase baja: conformado por usuarios de barrios populares que tienen un consumo bajo de energía eléctrica (estratos 1, 2 y 3).

- Redes de distribución para cargas comerciales

Caracterizadas por ser resistivas y se localizan en áreas céntricas de las ciudades donde se realizan actividades comerciales y se tienen edificios de oficinas. Tienen algún componente inductivo que bajan un poco el factor de potencia.

- Redes de distribución para cargas industriales

Tienen un componente importante de energía reactiva debido a la gran cantidad de motores instalados. Con frecuencia se hace necesario corregir el factor de potencia. Además de las redes independientes para fuerza motriz es indispensable distinguir otras para calefacción y alumbrado. A estas cargas se les controla el consumo de reactivos y se les realiza gestión de carga pues tienen doble tarifa (alta y baja) para evitar que su pico máximo coincida con el de la carga residencial.

- Redes de distribución para cargas de alumbrado público

Para contribuir a la seguridad ciudadana en las horas nocturnas se instalan redes que alimentan lámparas de mercurio y sodio de característica resistiva.

## 1.2. Topologías típicas

Los circuitos primarios de distribución se construyen básicamente en anillo abierto, mediante suplencias con equipos de operación bajo carga, gestión de telecontrol con otros circuitos cuando se presenten eventos de contingencia, mantenimiento u operativas. En los casos que aplique, sobre la red principal del circuito deben instalarse como mínimo dos equipos de operación bajo carga ya sea reconectadores o circuitos de cabecera, con el fin de garantizar la selectividad y operación de la red en caso de presentarse fallas y/o mantenimiento. Para la configuración de los circuitos de nivel de tensión II deben ser de tipo radial en anillo abierto y para la configuración de los circuitos de nivel de tensión III su esquema podrá ser de anillo abierto o abierto con transferencia [25].

### – Sistemas radiales

En el sistema radial la corriente eléctrica circula en una sola dirección, lo que ofrece un control sencillo del flujo ya que es realizado exclusivamente del centro de alimentación. La potencia principal se envía a un punto central, y desde allí se divide en circuitos con ramificaciones en serie para suministrar servicios a clientes individuales. El sistema tipo red se parece a una rejilla en paralelo y, dada su facilidad de lectura se ha convertido en el estándar para los sistemas de distribución subterráneos donde existe una densidad elevada de carga.

### – **Sistemas en anillo**

Esta topología se utiliza en situaciones en las que se quiere aumentar la fiabilidad del servicio, ya que, si hay una avería en un punto del anillo, se puede mantener dicho servicio si se alimenta desde otro punto.

### – **Configuración circuito anillo abierto**

La configuración en anillo abierto comprende la operación no simultánea de dos circuitos que presentan eventos de contingencia sobre cualquiera de ellos. Para aislar la zona de falla o de intervención se efectúa la operación automática mediante diferentes equipos de maniobra (interruptor, reconectador o seccionalizador). Esta configuración utiliza equipos de operación bajo carga entre circuitos normalmente abiertos que permite el restablecimiento del servicio y aislamiento de la zona de falla en forma automática con supervisión y control desde el Centro de Control.

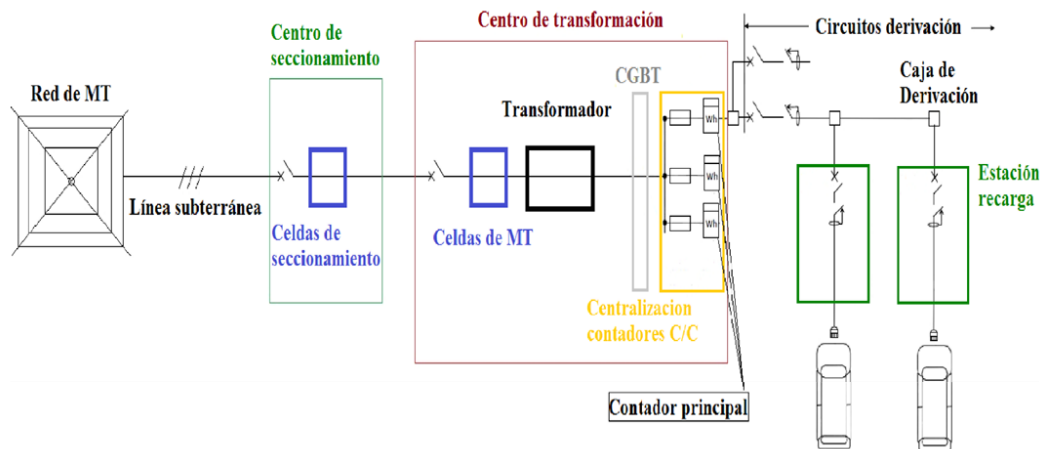
### – **Configuración circuito anillo de transferencia**

La configuración anillo de transferencia se opta para circuitos que presentan alto impacto de interrupción del servicio de energía. Para la operación de los equipos de maniobra deben configurarse para un flujo bidireccional, con el fin de aislar selectivamente la zona de falla en eventos de contingencia garantizando la continuidad del servicio. El esquema de anillo abierto con transferencia es utilizado para soporte de cargas sensibles como subestaciones MT/MT, clientes industriales y hospitales, para asegurar el suministro de tensión desde una red alternativa en el caso de una falla en la red principal.

# Capítulo 2

## Estaciones de recarga de vehículos eléctricos

Una Estación de Recarga de Vehículos Eléctricos (ERVE) es el lugar que provee electricidad para la recarga rápida de las baterías de los vehículos eléctricos e híbridos. Las estaciones de carga son elementos necesarios para el funcionamiento del vehículo eléctrico y surgen como respuesta a la industria automovilística a los desafíos planteados por el cambio climático y la escasez de combustibles fósiles. También buscan facilitar el acceso a la energía en cualquier momento y lugar. Para solucionar el problema de la autonomía y permitir que los futuros usuarios utilicen sus vehículos eléctricos con la máxima libertad, es esencial poner a su alcance una energía accesible y que esté disponible en cualquier lugar y momento: en el hogar, en carretera, en los estacionamientos, etc. A continuación en la Figura 2.1 se ilustra un esquema típico de conexión de una ERVE.



**Figura 2.1. Esquema de la instalación eléctrica de una ERVE [28]**

Las estaciones de recarga se pueden clasificar en diferentes aspectos debido a su tamaño, diseño, distintas potencias, flujos de corriente y tiempos de carga [28].

### 2.1. Tipos de carga

Existen actualmente tres tipos de carga que son:

- Carga lenta: está configurada para que la potencia demandada por el VE esté comprendida entre 3.5 kW y 22 kW, y que el tiempo máximo de carga esté comprendido entre 6 - 8 horas dependiendo de la capacidad de batería y su cargador. Para este caso los VE deben conectarse a cualquier enchufe doméstico, donde se producirá una carga con corriente alterna monofásica a 230V, 16A y con 3,5 kW de potencia mínima [28].
- Carga semi-rápida: este tipo de carga únicamente lo aceptan algunos vehículos. El tiempo de carga oscila entre 3 - 4 horas, y es alimentada a través de una corriente monofásica de 230V, 32A y 8-14 kW, o con corriente alterna trifásica de 400V, hasta 63A y de 22 a 43 kW que se logra recargar a una batería en 30 minutos [28].
- Carga rápida: está configurada para la potencia demandada por el VE que está comprendida entre los 43 - 150 kW, y el tiempo de carga varía en 10 - 30 min, dependiendo del tipo de cargador, la batería y la potencia proporcionada por este. Esta recarga está especialmente destinada a las estaciones de servicios que ofertan recarga eléctrica. Requiere de una instalación eléctrica compleja, puesto que necesita una corriente continua de 600V y 400A, y puede llegar a los 240 kW de potencia máxima, que permiten cargar el 80% de una batería en un intervalo de 5 a 30 minutos. También mediante el uso de corriente alterna de 500V, hasta 250A y 220 kW alcanza tiempos de recarga de 10 minutos (para un 80% de la capacidad) [28].

## **2.2. Modos de carga de un vehículo eléctrico**

Los modos de carga se definen por el mecanismo que utiliza el punto de carga para comunicarse con el VE. Para ello existe 4 tipos de modos de carga en los cuales las estaciones de recarga son categorizadas y debido a la potencia entregada se pueden clasificar. Estos modos de carga son presentados bajo el estándar IEC 61851-1 (ver Tabla 2.1 y Figuras 2.2 y 2.3).

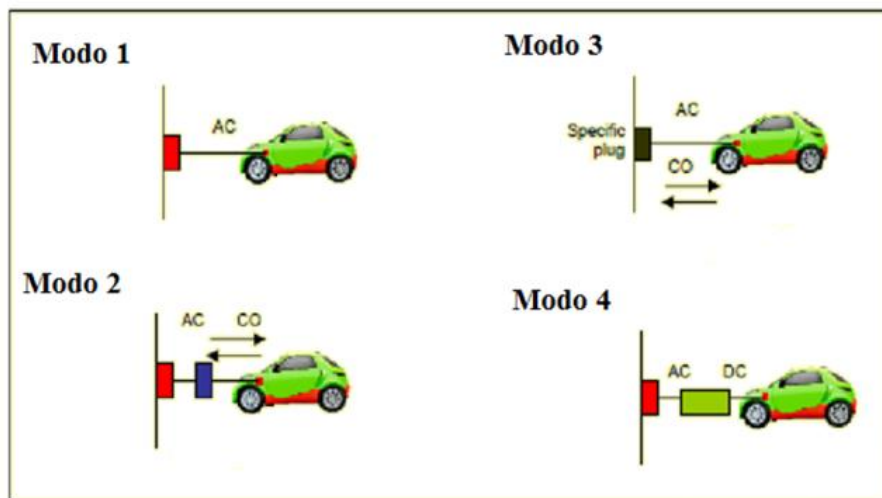
- Modo 1: se utiliza un tomacorriente convencional que se encuentre en una área residencial o industrial, de corriente normalizada, que pueden suministrar 13A y 16 A, conectándose a una tensión de 230 KV en c.a, en el lado de alimentación, monofásicos o trifásicos, utilizando fase, neutro y conductores de toma de tierra de protección [28].
- Modo 2: requiere un tomacorriente que puede suministrar corrientes de 32A, adicionando una protección diferencial. Los tomacorrientes monofásicos o trifásicos son normalizados, utilizando fase, neutro y conductores de toma de tierra de protección junto con un conductor piloto de control entre el VE y la clavija o la caja de control [28].
- Modo 3: tiene un grado elevado de comunicación con la red. Los dispositivos de control y protecciones se encuentran dentro del propio punto de recarga, y el cable incluye hilo piloto de comunicación integrado. Una de las principales características de este modo es que la comunicación con el VE permite medir la energía que se aplica en las baterías [28].



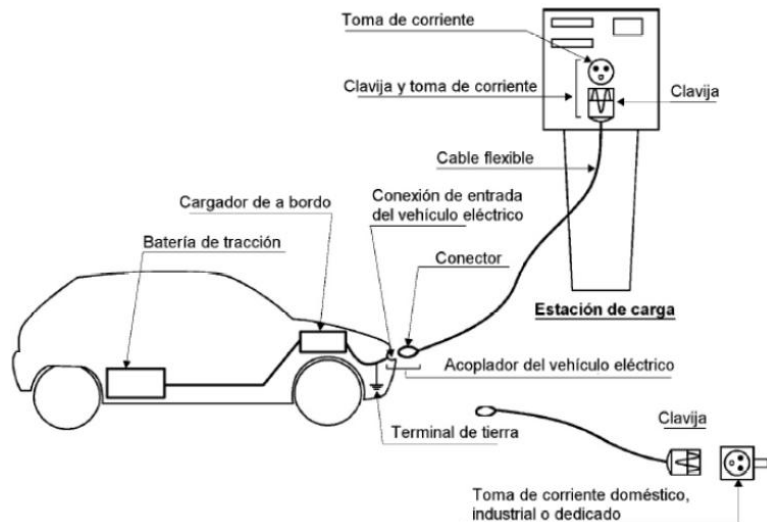
- Modo 4: posee un grado elevado de comunicación con la red. Posee un convertor c.c- c.a y solo se aplica a recarga rápida. Este modo de carga no es adecuado para instalaciones domésticas debido al alto voltaje y corriente que maneja (mayor a 500 V y 200 A, respectivamente). Esta configuración permite cargar el 80% de la batería en aproximadamente 30 minutos. A pesar de ser un modo muy llamativo, el uso de este modo afecta la vida útil de las baterías y genera un alto impacto en las redes de distribución [28].

**Tabla 2.1. Principales características de los modos de recarga [28]**

Modo	Corriente (A)	Potencia (kW)	Carga
Modo 1	Max. 16 A por fase	3.7 - 11	Lenta
Modo 2	Max. 32 A por fase	7.4 - 22	Lenta
Modo 3	Max. 64 A por fase	14.8 - 43	Semi-rápida
Modo 4	Hasta 400 A	Aprox. 50 - 150	Rápida



**Figura 2.2. Modos de carga de un vehículo eléctrico [28]**



**Figuran 2.3. Prototipo de conexión de un VE a una red eléctrica [28]**

### 2.3. Tipos de conectores

Los tipos de cargadores son los enchufes que sirven para la conexión de recarga de los vehículos eléctricos. Para llevar a cabo el uso de estos conectores se rigen a la norma IEC 62196. Existen diferentes tipos de conectores de acuerdo con sus configuraciones y características técnicas. A continuación se presentan algunos de ellos [28].

- Tipo 1: está compuesto por 5 bornes, dos de ellos para corriente, uno de tierra y dos complementarios de control y proximidad. Este tipo de conector está configurado para soportar una intensidad de 16 A para carga lenta y 80 A para carga rápida y la tensión máxima de 250 V AC monofásica [29].
- Tipo 2: está compuesto por 7 bornes, 4 de potencia (trifásico y neutro), otro de tierra y dos para comunicaciones, este tipo de conector está diseñado para soportar una corriente de 16 A para recarga lenta, monofásica o una corriente de 63 A para recarga rápida, trifásica, a una tensión de 250 V y 500 V respectivamente [29].
- Tipo 3: tiene 5 o 7 bornes, dependiendo si la corriente monofásica o trifásica, incluyendo en ambas tierra y comunicación con la red. Admite hasta 32 A y 500 V, es para recarga semi rápida [29].
- Tipo 4: está compuesto por 9 pines, dos de potencia 7 de señal, soporta una tensión máxima de 500 Vcc y corriente máxima de 120 A [29].
- Tipo 5: es un conector combinado CA/CC, posee 9 pines, 4 de potencia, uno de tierra, dos para comunicaciones y 2 para corriente directa [29].

# Capítulo 3

## Metodología propuesta

En este capítulo se plantea una metodología para llevar a cabo la ubicación óptima de estaciones de recarga para vehículos eléctricos a partir de una técnica heurística, con el propósito que pueda ser aplicada en el sistema de distribución, bajo las normas establecidas por los operadores de red; esto se realiza ya que la conexión de un vehículo eléctrico a las redes de distribución origina un impacto técnico y económico en el sistema eléctrico, debido a una posible recarga masiva que afectan tanto a la operación del sistema como a posibles refuerzos necesarios en la actual infraestructura eléctrica.

El objetivo principal es encontrar un punto de equilibrio entre ambos sistemas involucrados: el sistema de distribución y la red de transporte. De acuerdo a esto, se determina un número de rutas con sus respectivos trayectos y sus frecuencias de operación diarias y además el impacto en las pérdidas técnicas sobre la red de distribución. Posteriormente se define el mejor lugar que beneficie a ambos sistemas. Es preciso aclarar que las rutas de la red de transporte masivo son conocidas previamente y no son modificadas durante el proceso.

### 3.1. Estimación de pérdidas técnicas

Cuando se tiene un sistema de distribución real se pueden tener demasiados nodos en la red, por lo que considerarlos todos sería demasiado complicado para encontrar una solución adecuada. Por esto, en metodologías de ubicación de algunos elementos sobre el sistema de distribución el conjunto de nodos candidatos es reducido empleando indicadores de sensibilidad, con el fin de reducir el espacio de solución.

Uno de los índices más empleados en la operación y planeación de sistemas de distribución fue propuesto por Gallego *et al.* en [30], el cual es usado para encontrar un conjunto de nodos candidatos para ubicar condensadores sobre una red de distribución. En este proyecto se hará uso de este indicador, el cual permite definir ciertos índices en función del impacto sobre las pérdidas técnicas que generan sobre el sistema. A continuación se detallan los aspectos más relevantes de la aplicación de este indicador.

La filosofía de este indicador es encontrar los nodos que tengan un menor impacto en las pérdidas técnicas al instalar en ellos ERVE. Lo anterior se logra haciendo uso de la relación de cambio entre las pérdidas de potencia activa del sistema y las inyecciones de potencia reactiva en los nodos, así:

$$\frac{\partial L_S}{\partial Q_k} \quad (3.1)$$

Donde  $L_S$  representa las pérdidas de potencia activa en el sistema y  $Q_k$  la potencia reactiva inyectada en el nodo  $k$ .  $L_S$  se define con la siguiente ecuación:

$$L_S = \sum_{i \in \Omega_{kE}} \sum_{j \in \Omega_{kE}} \left[ \alpha_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j) \right] \quad (3.2)$$

En la ecuación (3.3), los factores  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  son:

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_{\min,i} V_{\min,j}} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (3.3)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_{\min,i} V_{\min,j}} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (3.4)$$

Donde  $r_{ij}$  es el elemento  $ij$  de  $R_{barra}$  (parte real de la matriz  $Z_{barra}$  del sistema).

Para el cálculo de los factores  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  se utiliza el valor de voltaje mínimo presentado en una de las fases de los nodos  $i$  y  $j$ , con esto se busca mejorar el perfil de tensión de los nodos teniendo en cuenta el valor de voltaje más bajo en cada uno de ellos.

Se aplica la derivada mostrada en la ecuación (3.1) a la ecuación (3.2), con lo que se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_S}{\partial Q_k} = & 2\alpha_{kk} Q_k + \sum_{j \in \Omega_{kE}, j \neq k} (\alpha_{kj} Q_j + \beta_{kj} P_j) + \sum_{i \in \Omega_{kE}, i \neq k} (\alpha_{ik} Q_i - \beta_{ik} P_i) \\ & + \sum_{i \in \Omega_{kE}} \sum_{j \in \Omega_{kE}} \left[ (P_i P_j + Q_i Q_j) \frac{\partial \alpha_{ij}}{\partial Q_k} + (Q_i P_j - P_i Q_j) \frac{\partial \beta_{ij}}{\partial Q_k} \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

Luego, se emplean las aproximaciones para  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  y las derivadas parciales utilizadas en [31] para simplificar la ecuación (3.5) y obtener:

$$\frac{\partial L_S}{\partial Q_k} = 2\alpha_{kk} Q_k + 2 \sum_{j \in \Omega_{kE}, j \neq k} (\alpha_{kj} Q_j + \beta_{kj} P_j) \quad (3.6)$$

El indicador de sensibilidad que proporciona la razón de cambio entre las pérdidas de potencia activa del sistema y la potencia reactiva en el nodo  $k$  está dado por la ecuación (3.6).

Teniendo en cuenta lo anterior, los nodos candidatos para la instalación y cantidad máxima de ERVE se determina de la siguiente manera:

- i.* Resolver el flujo de carga para el sistema sin ERVE.
- ii.* Calcular el índice de sensibilidad conforme a la ecuación (3.6) para cada uno de los nodos del sistema.
- iii.* Ordenar los factores de mayor a menor.

### **3.2. Metodología propuesta**

A continuación, se describe la metodología planteada para la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos (ERVE).

- **Paso 1.** Obtener las características más representativas del sistema eléctrico:
  - Ubicación sobre cartografía real del sector bajo estudio.
  - Diagrama unifilar de las redes eléctricas que pasan por el sector.
  - Longitud de los tramos de red.
  - Carga conectada.
- **Paso 2.** Obtener las características más representativas del sistema de transporte masivo:
  - Ubicación sobre cartografía real de las rutas que pasan por el sector.
  - Longitud de cada ruta y frecuencia diaria.
  - Carga conectada.
- **Paso 3.** Definir el valor nominal de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos que se desean emplear.
- **Paso 4.** Determinar el conjunto de posibles ubicaciones de una ERVE, en función de su impacto en las pérdidas técnicas sobre el sistema de distribución.
- **Paso 5.** Obtener el conjunto de posibles ubicaciones de una ERVE, en función de su impacto en las rutas del sistema de transporte masivo.
- **Paso 6.** Definir un ranking de las posibles ubicaciones de una ERVE en función de su impacto en ambos sistemas (eléctrico y transporte), considerando diversos factores de peso en función de su prioridad.

# Capítulo 4

## Aplicación y resultados

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología propuesta.

- **Paso 1.** Obtener las características más representativas del sistema eléctrico

Se emplea un sistema de distribución de energía eléctrica de 123 nodos ubicado en un sector de la ciudad de Pereira, el cual opera a un nivel de tensión de 13.2 kV. Los datos del sistema se encuentran en el Anexo. La ubicación y la topología del sistema se encuentran en las Figuras 4.1 y 4.2, respectivamente.



**Figura 4.1.** Ubicación del sector bajo estudio

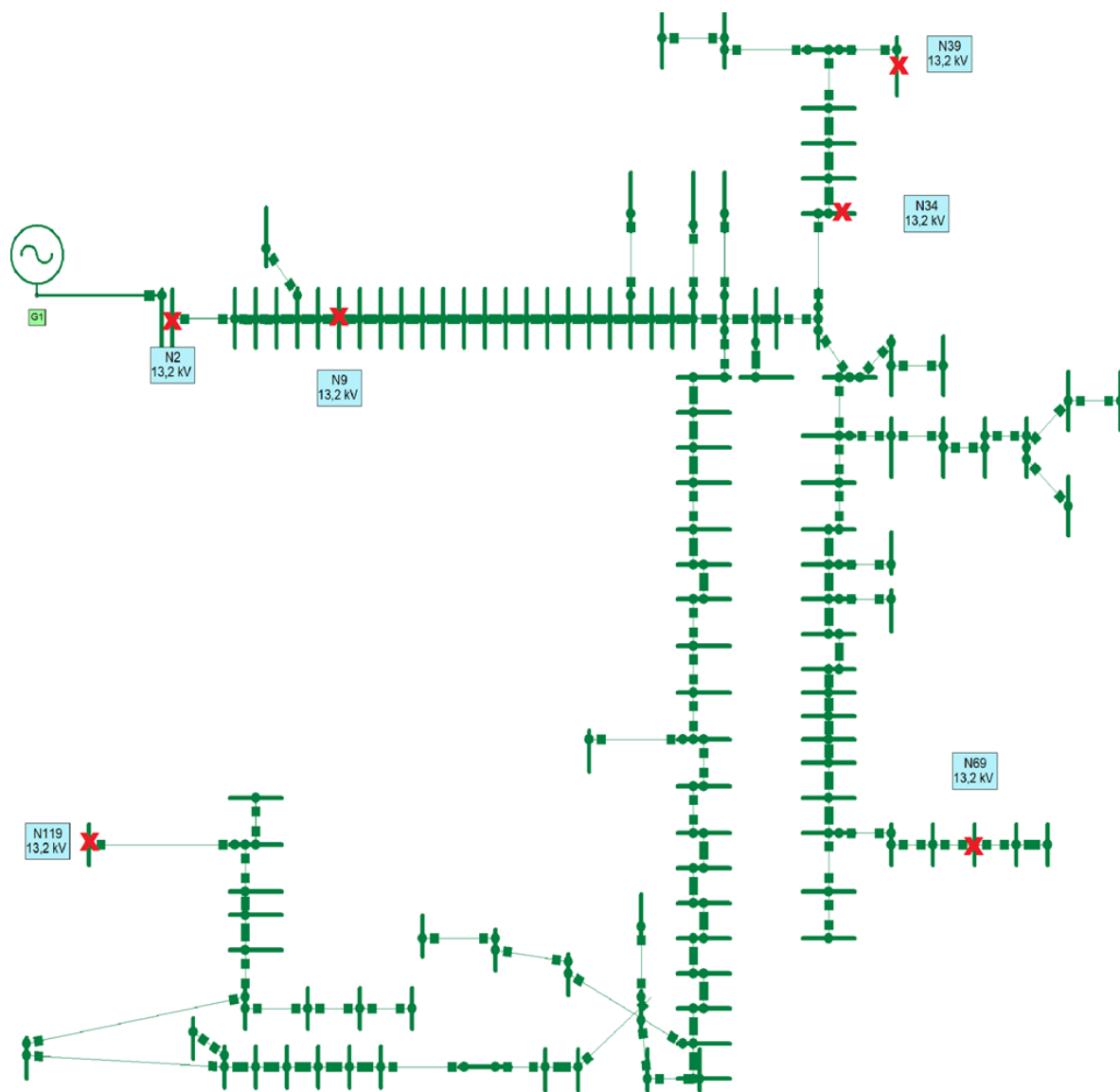
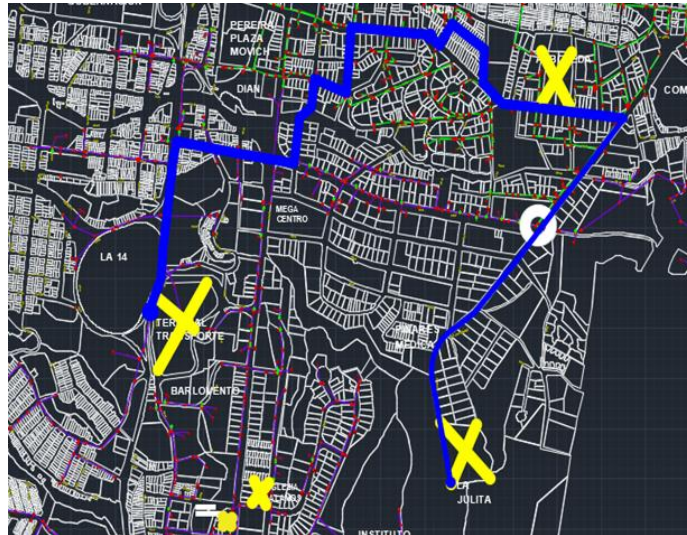


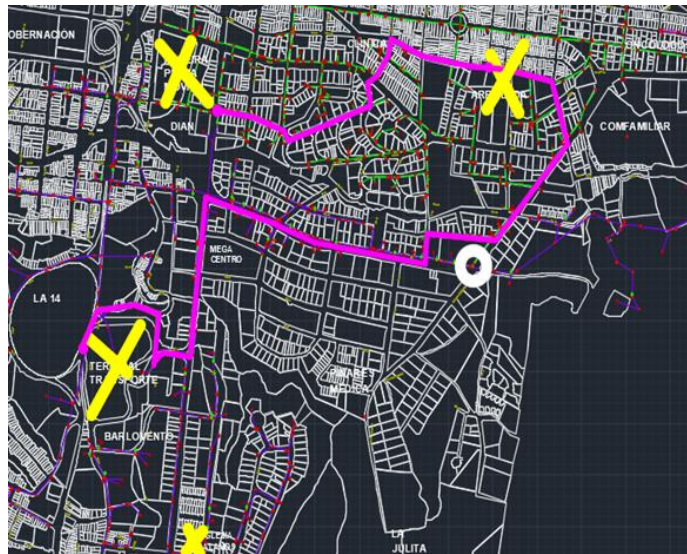
Figura 4.2. Sistema de prueba implementado en Neplan

- **Paso 2.** Obtener las características más representativas del sistema de transporte masivo

En este sector se tienen 15 rutas como se muestra en las Figuras 4.3 a 4.17.

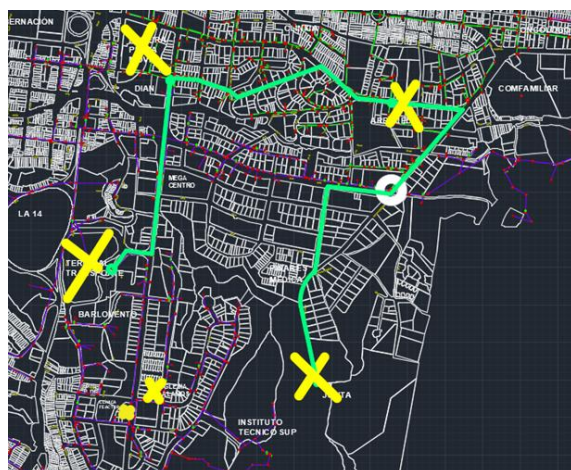


**Figura 4.3. Ruta 1**

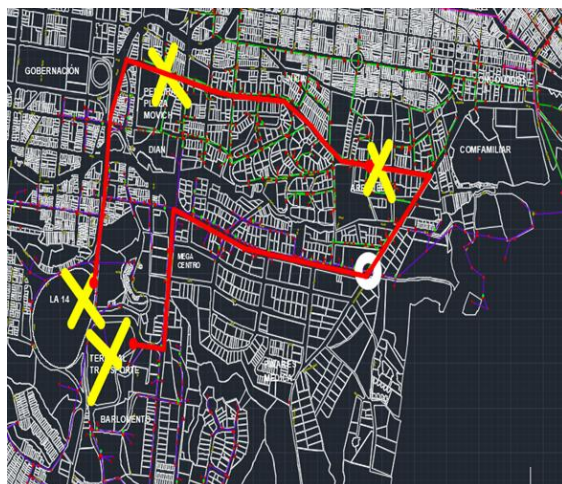


**Figura 4.4. Ruta 2**





**Figura 4.5. Ruta 3**



**Figura 4.6. Ruta 4**

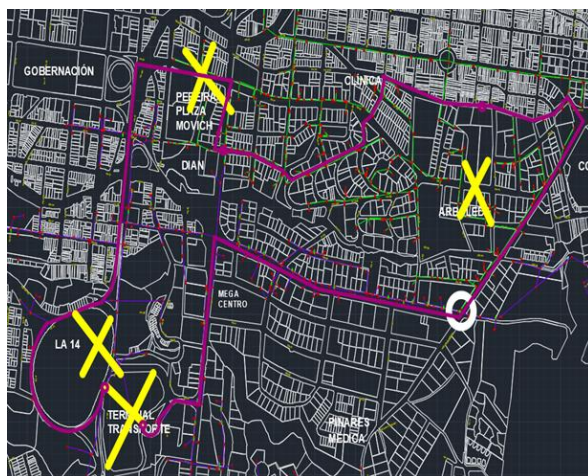
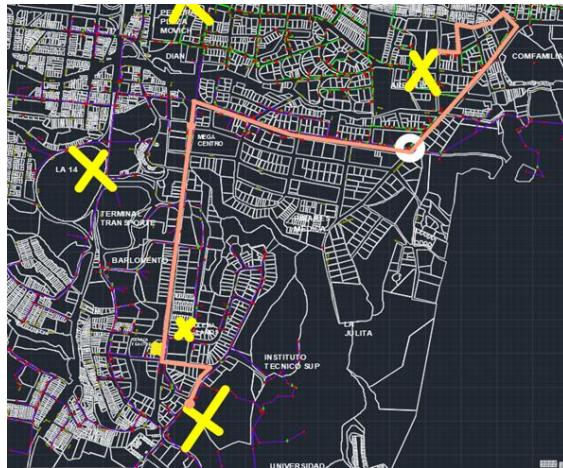
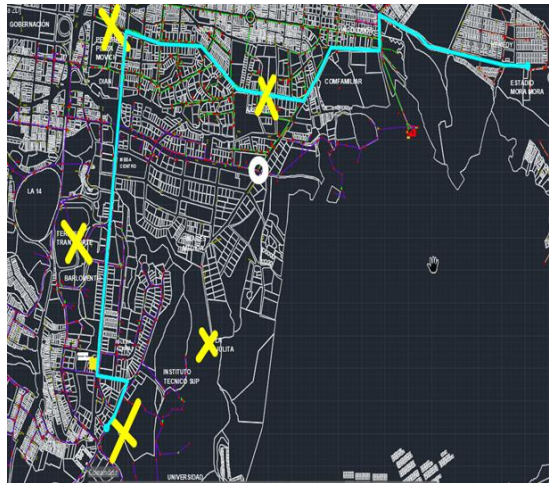


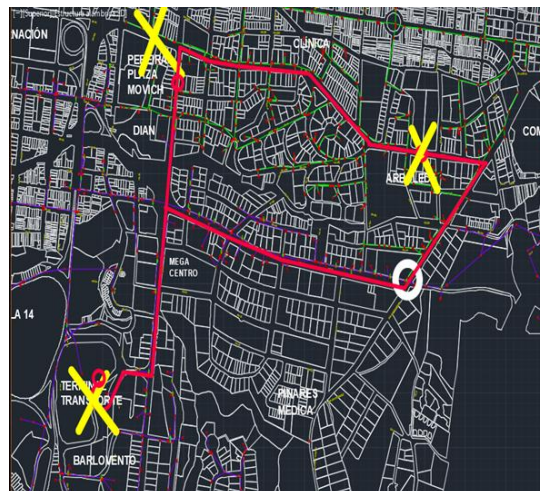
Figura 4.7. Ruta 5



**Figura 4.8. Ruta 6**

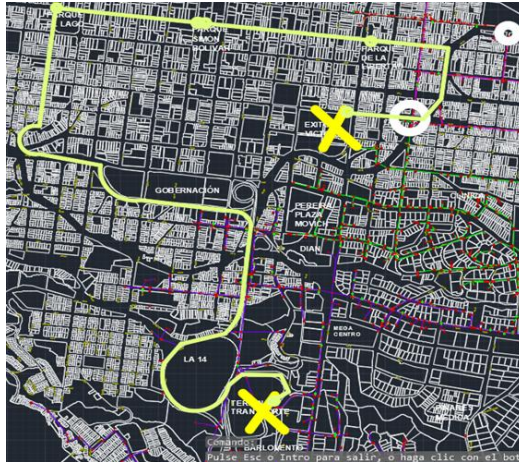


**Figura 4.9. Ruta 7**

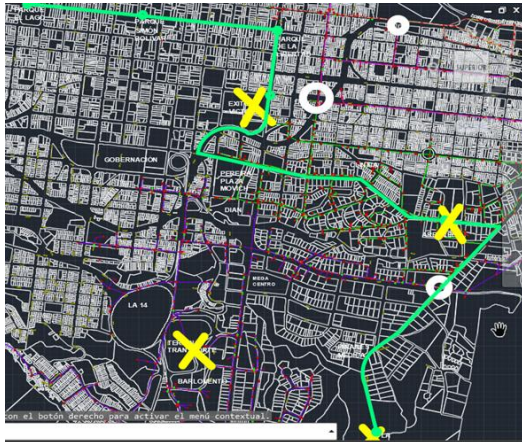


**Figura 4.10. Ruta 8**

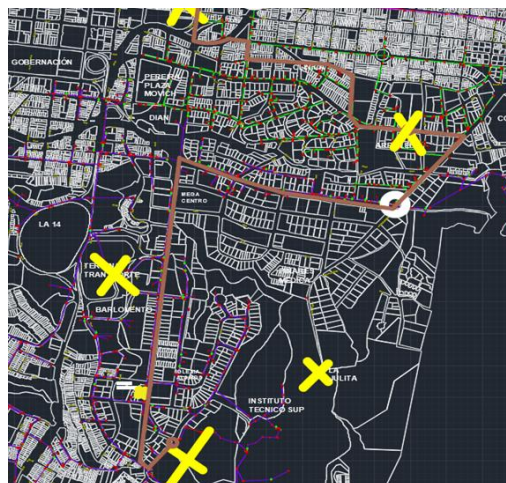




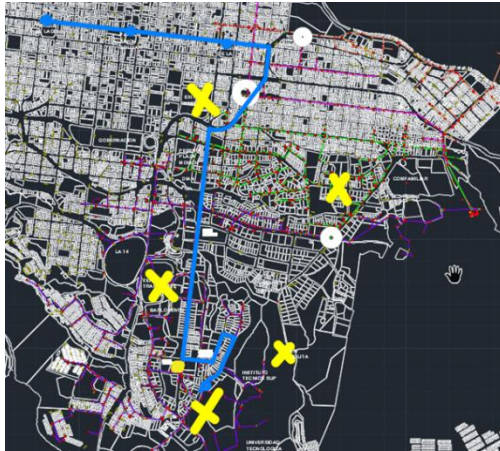
**Figura 4.11. Ruta 9**



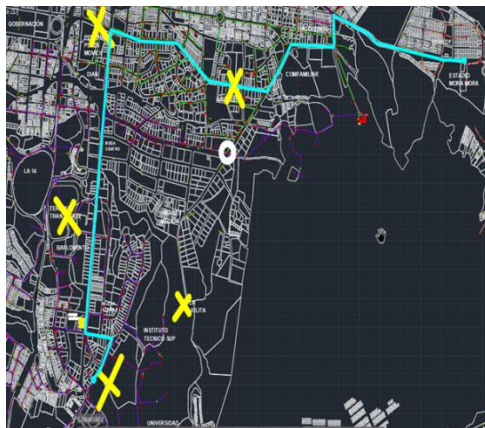
**Figura 4.12. Ruta 10**



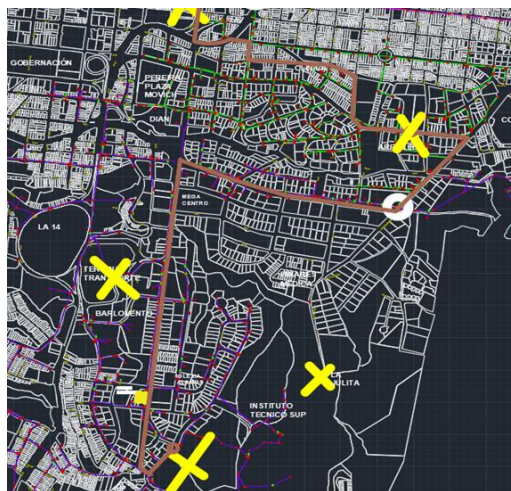
**Figura 4.13. Ruta 11**



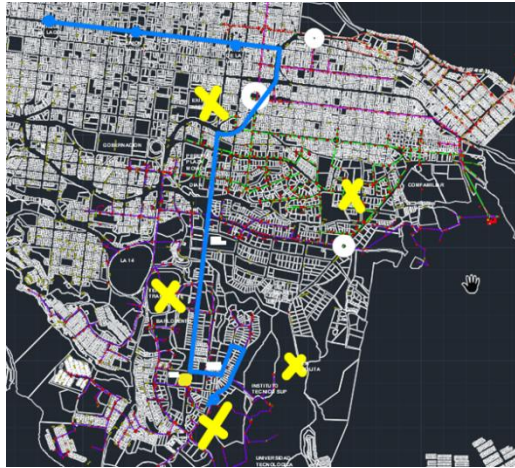
**Figura 4.14. Ruta 12**



**Figura 4.15. Ruta 13**



**Figura 4.16. Ruta 14**



**Figura 4.17. Ruta 15**

A continuación se ilustra en la Tabla 4.1 la distancia recorrida desde el origen hasta su último destino y la frecuencia diaria de cada ruta empleada.

**Tabla 4.1. Información de las rutas empleadas**

Rutas	Distancia (km)	Frecuencia
1	9,12	3
2	11,34	3
3	9,127	4
4	10,867	3
5	5,616	3
6	10,02	2
7	13,87	4
8	10,435	3
9	6,02	3
10	4,872	3
11	6,005	2
12	4,404	2
13	12,012	2
14	4,058	1
15	5,069	2

- **Paso 3.** Definir el valor nominal de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos que se desean emplear

Cada cargador ofrece una potencia de entrada de 62.5 kVA, y con un factor de potencia de 0.9 la potencia activa consumida por cada cargador es 59.4 kW. Para un número total de cargadores igual a 8, la potencia total es 598.5 kW. Además se consideran las cargas como el área de servicio, o la iluminación exterior. De acuerdo a esto, el valor total de consumo es 497,2 kW (ver Tabla 4.2).



**Tabla 4.2. Carga total conectada a una ERVE**

Aspecto	Valor
Cargadores de la Electrolinera	475,2 kW
Área de Servicio	20,0 kW
Iluminación exterior	2,0 kW
<b>Total</b>	<b>497,2 kW</b>

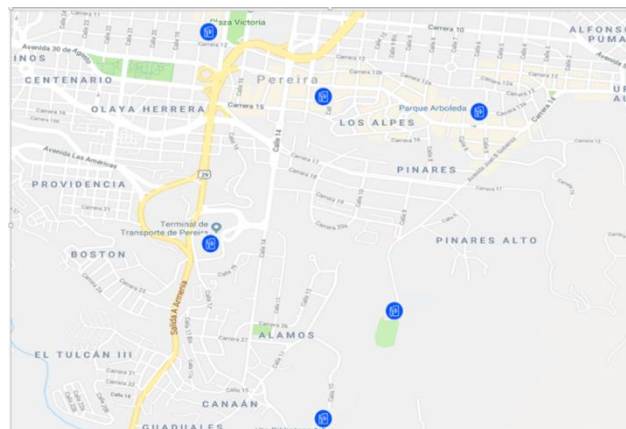
- **Paso 4.** Determinar el conjunto de posibles ubicaciones de una ERVE, en función de su impacto en las pérdidas técnicas sobre el sistema de distribución

Para obtener el conjunto de lugares candidatos para instalar ERVE se aplicó la metodología descrita en el numeral 3.1. En este proyecto se seleccionaron los seis primeros lugares, en función del menor impacto generado a las pérdidas técnicas de la red (ver Tabla 4.3).

**Tabla 4.3. Índices de sensibilidad obtenidos**

Nodo	Factor de sensibilidad
69	5,69
119	7,67
39	9,81
28	10,24
9	13,03
2	14,20

A continuación se ilustra en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se ilustra la ubicación geográfica de las ERVE, su ubicación sobre el diagrama unifilar y las distancias (tramos) entre cada una de ellas. En la Tabla 4.4 se presentan las distancias existentes entre los puntos candidatos.



**Figura 4.18. Lugares candidatos para la ubicación de ERVE**

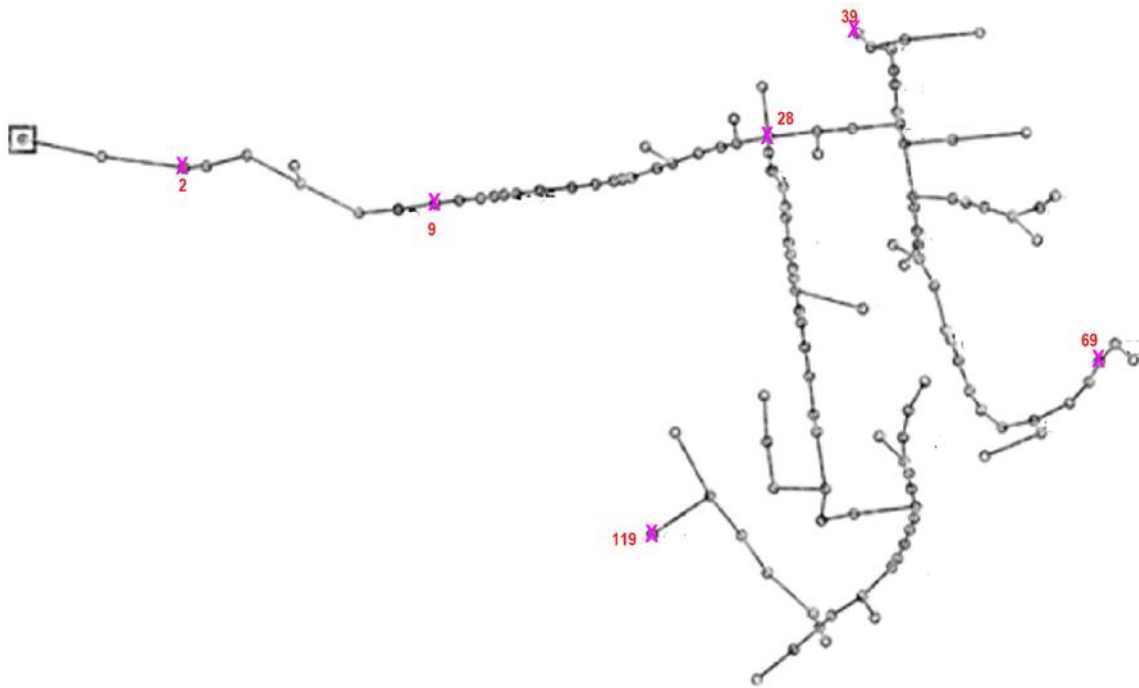


Figura 4.19. Ubicación de las ERVE

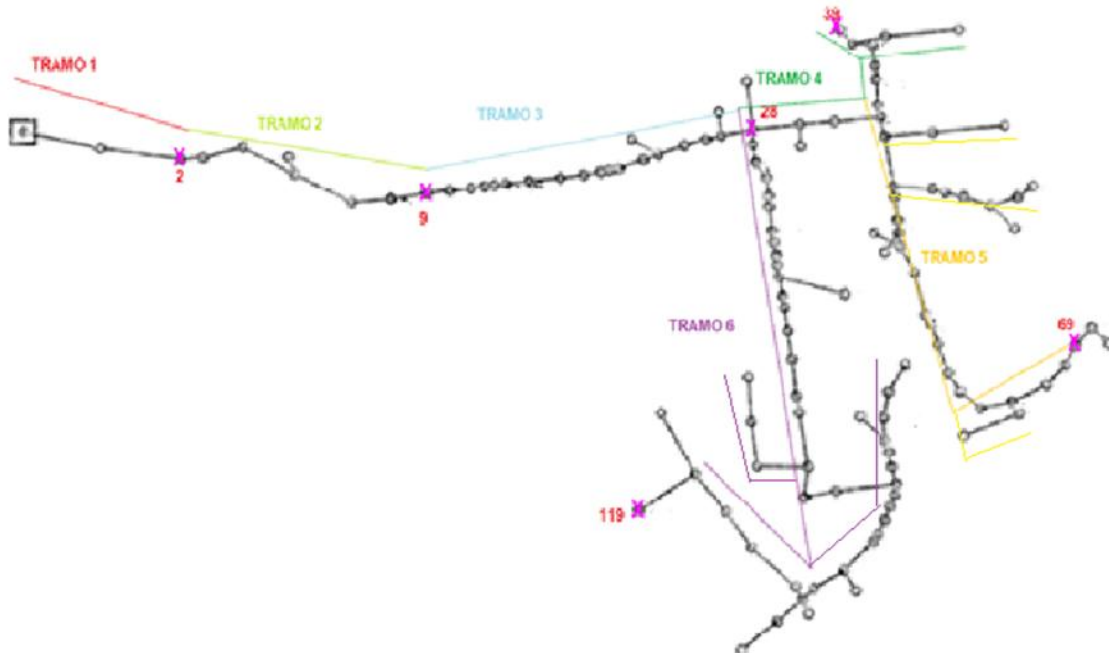


Figura 4.20. Ubicación de las ERVE

**Tabla 4.4. Distancias de los tramos entre ERVE**

Tramos	Longitud (km)
1	3
2	8
3	18
4	15
5	33
6	46

- **Paso 5.** Obtener el conjunto de posibles ubicaciones de una ERVE, en función de su impacto en las rutas del sistema de transporte masivo

En la Tabla 4.5 se presenta la cantidad de rutas transitadas por cada posible punto para ubicar ERVE.

**Tabla 4.5. Rutas transitadas por cada lugar candidato**

Nodo	Ubicación ERVE	Cantidad de rutas transitadas
2	UTP	6
9	Terminal	10
28	Pereira Plaza	4
39	Victoria	5
69	Parque Arboleda	11
119	La Julita	4

**Paso 6.** Definir un ranking de las posibles ubicaciones de una ERVE en función de su impacto en ambos sistemas (eléctrico y transporte), considerando diversos factores de peso en función de su prioridad

En la Tabla 4.6 se ilustran las características de cada lugar candidato en función de su impacto en ambos sistemas.

Se puede observar como existen lugares que pueden beneficiar a ambos sistemas. Por ejemplo la ERVE ubicada en el nodo 69, presenta un índice relacionado con las pérdidas técnicas bajo (5,69), y además presenta una cantidad de rutas alta en comparación con otros lugares (11 rutas).

De acuerdo a esto, se propone este lugar como nodo prioritario para ubicar las ERVE, debido al beneficio que presenta para ambos sistemas.



**Tabla 4.6. Características de los lugares candidatos**

<b>Ubicación de las ERVE</b>	<b>Ruta</b>	<b>Origen</b>	<b>Trayecto final (km)</b>	<b>Factor de sensibilidad</b>	<b>Nodo</b>
Parque Arboleda	1	Terminal	9,55	5,69	69
	2	Terminal	11,50		
	3	Terminal	9,14		
	4	Terminal	9,97		
	5	Terminal	4,61		
	6	UTP	9,23		
	7	UTP	13,87		
	8	UTP	10,44		
	9	UTP	4,03		
	10	Terminal	4,87		
	15	Terminal	6,01		
La Julita	1	Terminal	9,55	7,67	119
	3	Terminal	11,50		
	7	UTP	13,87		
	12	El Lago	1,70		
Pereira Plaza	2	Terminal	11,50	10,24	28
	3	Terminal	9,14		
	5	Terminal	7,05		
	10	Terminal	2,84		
Terminal	1	Terminal	9,55	13,03	9
	2	Terminal	11,50		
	3	Terminal	9,14		
	4	Terminal	9,97		
	5	Terminal	7,05		
	7	UTP	13,87		
	8	UTP	4,60		
	10	Terminal	2,84		
	11	Victoria	2,42		
	15	Terminal	6,01		
UTP	6	UTP	9,23	14,20	2
	7	UTP	13,87		
	8	UTP	4,60		
	9	UTP	8,15		
	13	UTP	12,11		
	14	UTP	9,10		
Victoria	4	Terminal	9,97	9,81	39
	9	UTP	8,15		
	11	Victoria	2,42		
	12	El Lago	1,70		
	13	UTP	12,11		

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- En este proyecto de grado se propuso e implementó una metodología basada en criterios heurísticos, la cual permite ubicar de forma adecuada estaciones de recarga de vehículos eléctricos (ERVE) en redes de media tensión en sistemas de distribución de energía eléctrica. Esta metodología puede ser aplicada por Operadores de Red (OR) en el sector eléctrico debido a que puede considerar escenarios reales de operación. Esto es, OR que deseen ubicar ERVE en su sistema o agentes externos que deseen ubicar ERVE en los sistemas de distribución. Esta metodología tiene como objetivo principal encontrar la ubicación óptima de ERVE que permita reducir el impacto de su integración en la planeación de las redes de distribución de energía eléctrica, la cual debe garantizar el cumplimiento de criterios técnicos y económicos al menor costo posible, para los participantes involucrados. A pesar de que no se considera el problema del ruteo de vehículos eléctricos, el conjunto de posibles ubicaciones de las ERVE es proporcionado previamente en función de las necesidades de cada uno de los agentes involucrados; esto es, la red eléctrica y la red de transporte masivo.
- En el desarrollo de la metodología se considera un indicador de sensibilidad que permite definir el número de nodos candidato a instalar ERVE, las cuales impactan de una menor manera las condiciones operativas de la red, esto es, menores pérdidas técnicas del sistema. De igual forma se realiza un análisis de las ERVE para la red de transporte, en función de su impacto en las rutas de transporte masivo existentes. Finalmente, se presentan los puntos más atractivos que benefician a ambas redes. La mejor solución depende de los criterios establecidos dados por el (los) tomador (es) de decisiones.
- El desarrollo de esta metodología proporciona herramientas adicionales para la toma de decisiones de los actores involucrados en la planeación de las redes de distribución, con el fin de evitar situaciones indeseadas, y que además permita su integración en los nuevos esquemas de operación de las redes eléctricas, permitiendo encontrar un mejor beneficio técnico-económico.

### 5.2. Recomendaciones

- Plantear un modelo matemático que permita formular claramente el problema planteado y resolverlo usando un software de optimización comercial o una técnica heurística.

- Involucrar en el problema el ruteo de vehículos eléctricos, con el fin de ampliar la metodología a situaciones diferentes a redes de transporte masivo, es decir, problemas de transporte de otro tipo, como recogida y entrega de mercancía, electrolíneas para vehículos particulares, etc.

# Bibliografía

- [1] Kyoto Protocol: Status of Ratification. *Organización de las Naciones Unidas* (en inglés). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 14 de enero de 2009.
- [2] A. Sumper, P. Lloret-Gallego, R. Villafáfila-Robles, A. Sudria-Andreu, E. Valsera-Naranjo, "Electrical Vehicles: state of art and issues for their connection to the network", in *IEEE Electrical Power Quality*, 2009, pp. 1-3.
- [3] Diario La República. Edición del jueves 25 de agosto de 2016. Bogotá, Colombia. Consultado el 05 de Septiembre de 2015. [Online]: [http://www.larepublica.co/jap%C3%B3n-el-primer-pa%C3%ADs-con-m%C3%A1s-electrolineras-que-gasolineras\\_414006](http://www.larepublica.co/jap%C3%B3n-el-primer-pa%C3%ADs-con-m%C3%A1s-electrolineras-que-gasolineras_414006)
- [4] Decreto 2909 de 2013. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Colombia, Diciembre de 2013.
- [5] Norma Técnica Colombiana 2050 (NTC 2050), Sección 625. República de Colombia.
- [6] M. N. Eisler, "ATesla in every garage?," *IEEE Spectrum*, vol. 53, no. 2, pp. 34-55, Enero 2016.
- [7] Consultado el 05 de Septiembre de 2016. [Online]: <http://www.tractordata.com/farm-tractors/000/0/1/18-allis-chalmers-d17.html>
- [8] Consultado el 05 de Septiembre de 2016. [Online]: [https://history.gmheritagecenter.com/wiki/index.php/1966\\_Electrovair\\_II\\_Concept](https://history.gmheritagecenter.com/wiki/index.php/1966_Electrovair_II_Concept)
- [9] Consultado el 05 de Septiembre de 2016. [Online]: <http://flux-capacitor.co.uk/the-car/>
- [10] Consultado el 05 de Septiembre de 2016. [Online]: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stanford\\_R.\\_Ovshinsky](https://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_R._Ovshinsky)
- [11] A. Schroeder and T. Traber, "The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles", *Energy Policy*, Vol. 43, pp. 136-144, 2012.
- [12] S. Wagner, M. Götzinger, and D. Neumann, "Optimal location of charging stations in smart cities: a point of interest based approach", 34th International Conference on Information Systems (ICIS), Milán, 2013.
- [13] T.D. Chen, K.M. Kockelmann, and M. Khan, "The Electric Vehicle Charging Station Location Problem: A Parking-Based Assignment Method for Seattle", *Proceedings of the 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington DC, 2013.
- [14] M. Andrews, M.K. Dogru, J.D. Hobby, Y. Jin, and H. Tucci, "Modeling and Optimization for Electric Vehicle Charging Infrastructure", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference*, 2013.
- [15] N. Rastegarfar, B. Kashanizadeh, M. Vakilian, and S. Ali Barband, "Optimal Placement of Fast Charging Station in a Typical Microgrid in Iran", *IEEE European Energy Market (EEM)*, pp 1-7, May 2013.
- [16] M.T. Sebastiani, R. Luders and K.V.O Fonseca, "Allocation of charging stations in an electric vehicle network using simulation optimization", *Simulation Conference (WSC)*, 2014 Winter, pp. 1073-1083, Savannah, GA, December 2014.
- [17] P. Ponrattanasak and N. Leeprechanon, "Optimal Placement of EV Fast Charging Stations

- Considering the Impact on Electrical Distribution and Traffic Condition”, International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green Energy for Sustainable Development (ICUE 2014) Jomtien Palm Beach Hotel and Resort, Pattaya City, Thailand, March 2014.
- [18] A.Y.S. Lam, YW. Leng and X. Chu, “Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol 5, No 6, November 2014.
  - [19] Y. Li, J. Luo, C.Y. Chow, K.L. Chan, Y. Ding and F. Zhang, “Growing the Charging Station Network for Electric Vehicles with Trajectory Data Analytics”, *Data Engineering (ICDE)*, 2015 IEEE 31st International Conference, pp. 1376-1387, April 2015.
  - [20] S. Chen, Y. Shi, X. Chen and F. Qi, “Optimal Location of Electric Vehicle Charging Stations Using Genetic Algorithm”, *IEICE Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, 2015.
  - [21] Consultado el 05 de Septiembre de 2016. [Online]: <http://corporativo.codensa.com.co/ES/PRENSA/Paginas/sala-prensa.aspx>
  - [22] [http://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Vehiculos\\_Electricos\\_Oct.pdf](http://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Vehiculos_Electricos_Oct.pdf)
  - [23] <https://www.recargacocheselectricos.com/concurso-cuales-son-los-paises-con-estaciones-recarga-mas-grandes-descubrelo-en-nuestro-ranking/>
  - [24] <http://v3.espacenet.com/te xtdoc?DB=EPODOC&IDX =US2012299531>
  - [25] S. Ramírez, “Redes de distribución de energía”, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Tercera Edición, Manizales.
  - [26] T. Gonen, “Electric Power Distribution System Engineering”, Mc-Graw Hill Series in Electrical Engineering, 1986.
  - [27] W.H. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis”, CRC Press, 2002.
  - [28] Salmerón, J.M., “Diseño de la instalación eléctrica de una electrolinera”, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III, Madrid, 2012
  - [29] <http://www.recargacocheselectricos.com/tipos-conectores-vehiculos-electricos/>
  - [30] Gallego, R.A., Monticelli, A., Romero, R., “Um metodo aproximado de otimização usado na reconfiguração de redes de distribuição”, Chile, 1995.
  - [31] O. I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory*, McGraw Hill, 1970.

# Anexo

En la tabla A.1 se muestran los parámetros de las líneas y la demanda nodal.

**Tabla A1. Datos del sistema de prueba**

Envio	Recibo	R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	P [kW]	Q [kVar]	Inom [A]
1	2	0,06718	0,06809	20,167	9,767	359
2	3	0,06866	0,06959	2,064	1,000	359
3	4	0,01846	0,01871	10,558	5,114	359
4	5	0,03527	0,03575	6,144	2,976	359
5	6	0,05221	0,05292	0,000	0,000	359
6	7	0,05039	0,01947	51,508	24,946	184
6	8	0,05654	0,05730	0,000	0,000	359
8	9	0,03269	0,03313	18,269	8,848	359
9	10	0,03108	0,03150	20,294	370,797	359
10	11	0,02006	0,02033	15,412	7,464	359
11	12	0,01770	0,01794	8,839	4,281	359
12	13	0,01105	0,01120	11,348	5,496	359
13	14	0,00847	0,00859	3,517	1,703	359
14	15	0,01037	0,01051	11,257	5,452	359
15	16	0,01926	0,01952	10,131	4,906	359
16	17	0,02676	0,02712	20,840	10,093	359
17	18	0,01967	0,01994	21,109	10,224	359
18	19	0,01539	0,01559	9,893	4,791	359
19	20	0,00740	0,00750	8,634	4,182	359
20	21	0,00769	0,00780	15,916	7,708	359
21	22	0,02289	0,02320	12,252	5,934	359
22	23	0,01369	0,01387	22,497	10,896	359
23	24	0,07635	0,02950	46,349	22,448	184
23	25	0,02358	0,02390	20,518	9,937	359
25	26	0,01955	0,01981	15,719	7,613	359
26	27	0,01366	0,01385	0,000	0,000	359
27	28	0,06750	0,02608	68,674	33,260	184
27	29	0,02729	0,02766	0,000	0,000	359
29	30	0,07251	0,04087	48,413	23,447	275
29	31	0,05775	0,03255	2,568	1,244	275
31	32	0,02945	0,02985	27,151	13,150	359
32	33	0,03912	0,03965	20,734	10,042	359

33	34	0,02295	0,01019	0,000	0,000	240
34	35	0,03927	0,02214	8,466	4,100	275
35	36	0,02005	0,01130	0,000	0,000	275
36	37	0,03107	0,01752	0,000	0,000	275
37	38	0,02419	0,01364	0,000	0,000	275
38	39	0,02528	0,01425	95,468	46,237	275
38	40	0,08701	0,02559	0,000	0,000	177
40	41	0,26527	0,06476	68,609	33,229	140
33	42	0,02020	0,02048	0,000	0,000	359
42	43	0,03982	0,04036	40,493	19,612	359
43	44	0,06104	0,06187	0,000	0,000	359
42	45	0,14654	0,05662	0,000	0,000	184
45	46	0,03258	0,03302	0,000	0,000	359
46	47	0,01178	0,01194	0,000	0,000	359
47	48	0,01579	0,01600	9,453	4,578	359
48	49	0,02458	0,02491	2,493	1,208	359
49	50	0,02458	0,02491	0,000	0,000	359
50	51	0,01711	0,01734	9,788	4,741	359
49	52	0,08734	0,03374	8,232	3,987	184
45	53	0,03034	0,01172	0,000	0,000	184
53	54	0,06614	0,02555	0,000	0,000	184
54	55	0,03827	0,01479	0,137	0,066	184
55	56	0,06358	0,02457	112,105	54,295	184
55	57	0,03856	0,01490	0,000	0,000	184
57	58	0,04636	0,02797	10,499	5,085	242
55	56	0,06358	0,02457	112,105	54,295	184
55	57	0,03856	0,01490	0,000	0,000	184
57	58	0,04636	0,02797	10,499	5,085	242
57	59	0,05358	0,03233	0,000	0,000	242
59	60	0,08142	0,04913	0,000	0,000	242
60	61	0,01828	0,01103	36,453	17,655	242
61	62	0,04018	0,02424	0,000	0,000	242
62	63	0,05624	0,03393	0,000	0,000	242
63	64	0,03912	0,02360	14,253	6,903	242
64	65	0,04411	0,02661	0,000	0,000	242
65	66	0,04956	0,02990	0,000	0,000	242
66	67	0,06074	0,03665	16,333	7,910	242
67	68	0,04804	0,02899	45,438	22,007	242
68	69	0,03954	0,02386	10,914	5,286	242
69	70	0,04001	0,02414	0,000	0,000	242
70	71	0,06069	0,02345	40,372	19,553	184
66	72	0,03842	0,01484	35,638	17,260	184
72	73	0,14365	0,05550	11,973	5,799	184

31	74	0,09696	0,02367	28,571	13,838	140
29	75	0,01546	0,01567	13,710	6,640	359
75	76	0,02721	0,02072	0,000	0,000	276
76	77	0,02698	0,02054	35,344	17,118	276
77	78	0,02880	0,02193	0,000	0,000	276
78	79	0,01638	0,01247	18,884	9,146	276
79	80	0,03701	0,02818	0,000	0,000	276
80	81	0,01763	0,01342	0,726	0,352	276
81	82	0,02010	0,01530	4,357	2,110	276
82	83	0,01530	0,01165	47,288	22,903	276
83	84	0,01770	0,01348	0,000	0,000	276
84	85	0,08588	0,06539	42,923	20,789	276
84	86	0,03068	0,02336	765,600	9,829	276
86	87	0,01712	0,01303	53,667	25,992	276
87	88	0,03656	0,02783	63,575	30,791	276
88	89	0,04301	0,03275	22,364	10,832	276
89	90	0,05638	0,04293	6,858	3,322	276
90	91	0,02597	0,01977	19,352	9,373	276
91	92	0,08428	0,06417	13,365	6,473	276
92	93	0,05693	0,03435	51,906	25,139	242
93	94	0,04085	0,03110	24,018	11,632	276
94	95	0,14219	0,05494	0,000	0,000	184
95	96	0,05048	0,01950	49,317	23,885	184
96	97	0,04325	0,01671	17,354	8,405	184
97	98	0,03583	0,01384	0,000	0,000	184
98	99	0,08901	0,03439	23,581	11,421	184
98	100	0,06494	0,02509	0,000	0,000	184
100	101	0,07577	0,02928	57,409	27,804	184
101	102	0,08759	0,03384	105,737	51,211	184
95	103	0,02019	0,01218	8,211	3,977	242
103	104	0,02245	0,01355	7,684	3,721	242
104	105	0,02699	0,01628	4,696	2,274	242
105	106	0,02796	0,01687	2,973	1,440	242
106	107	0,01797	0,01084	5,069	2,455	242
107	108	0,06820	0,04115	0,000	0,000	242
108	109	0,06593	0,02547	488,241	236,466	184
108	110	0,05735	0,03461	24,598	11,913	242
110	111	0,02800	0,01689	0,000	0,000	242
111	112	0,04107	0,01587	86,563	41,924	184
111	113	0,05476	0,03304	19,087	9,244	242
113	114	0,07756	0,04680	3,295	1,596	242
111	115	0,02677	0,01615	31,427	15,221	242
115	116	0,09993	0,06030	2,316	1,122	242



116	117	0,07772	0,04689	1,587	0,769	242
117	118	0,08530	0,05147	27,001	13,077	242
118	119	0,10916	0,06587	27,191	13,169	242
118	120	0,12513	0,07550	109,175	52,876	242
92	121	0,07672	0,04629	9,635	4,666	242
121	122	0,08448	0,05097	27,035	13,094	242
122	123	0,08256	0,04981	32,230	15,610	242